МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE







УДК 620.179.17 https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-4-328-336

# Применение и оценка технического состояния композиционных материалов в летательных аппаратах и беспилотных летательных аппаратах акустико-эмиссионным методом неразрушающего контроля



**А. В. Попов** ✉, **А. О. Самуйлов** , **И. С. Черепанов** ✉
Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж, Российская Федерация)
✉ veselova.27@icloud.com

***Введение.*** В статье проведен анализ применения композиционных материалов, как основного определяющего способа уменьшения массы планера летательного аппарата и беспилотного летательного аппарата. Перспективные методы неразрушающего контроля позволяют оценить техническое состояние данных материалов, а также с высокой точностью определить концентраторы напряжений на планере летательного аппарата и беспилотного летательного аппарата с целью принятия решения о дальнейшей эксплуатации данного объекта контроля.
Целью исследования являлось повышение точности и оперативности оценки трещиностойкости композиционных материалов путем применения акустико-эмиссионного контроля.
***Материалы и методы.*** Приведена номенклатура применяемых композиционных материалов при строительстве различных летательных аппаратов, в том числе беспилотных, представлены наиболее возможные вероятные дефекты данных материалов вследствие влияния эксплуатационных факторов. Произведено сравнение применяемых методов неразрушающего контроля композиционного материала и выборка наиболее подходящего согласно специфическим преимуществам. Проведен эксперимент по определению пределов прочности углепластика при помощи аппаратно-программного комплекса акустико-эмиссионным методом. Представлены результаты исследования в виде рисунков, проецируемых аппаратно-программным комплексом.
***Результаты исследования.*** Описано применение акустико-эмиссионного метода контроля композиционного материала.
***Обсуждение и заключение.*** Полученные в результате проведенного эксперимента результаты могут быть использованы в процессе определения пределов прочности различных композиционных материалов акустико-эмиссионным методом неразрушающего контроля для проведения оценки технического состояния в машиностроении, судостроении и авиастроении. Статья рекомендована научным сотрудникам, занимающимся проектированием летательных аппаратов и беспилотных летательных аппаратов.

***Ключевые слова:*** композиционный материал, стеклопластик, боропластик, углепластик, органопластик, летательный аппарат, беспилотный летательный аппарат, неразрушающий контроль, акустико-эмиссионный контроль, рентгеновский контроль, тепловой контроль.

***Для цитирования:*** Попов, А. В. Применение и оценка технического состояния композиционных материалов в летательных аппаратах и беспилотных летательных аппаратах акустико-эмиссионным методом неразрушающего контроля / А. В. Попов, А. О. Самуйлов, И. С. Черепанов // Advanced Engineering Research. — 2021. — Т. 21, № 4. — С. 328–336. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-4-328-336





# Application and evaluation of the technical condition of composite materials in aircraft and unmanned aerial vehicles by acoustic emission method of nondestructive testing

**A. V. Popov** ✉, **A. O. Samuylov**, **I. S. Cherepanov**
Military Educational and Scientific Center of the Air Force "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh, Russian Federation)

***Introduction.*** The paper analyzes the application of composite materials as the main determining method of reducing the mass of the airframe and an unmanned aerial vehicle. Advanced nondestructive testing methods provide assessing the technical condition of these materials, as well as determining stress concentrators on the airframe and an unmanned aerial vehicle with high accuracy in order to make a decision on the further operation of this object under control. The objective of the work was to increase the accuracy and efficiency of the assessment of crack resistance of composite materials through the acoustic emission control.
***Materials and Methods.*** This paper presents the nomenclature of composite materials used in the construction of various aircraft, including unmanned aerial vehicles. The most possible probable defects of these materials due to the influence of operational factors are presented. The applied methods of nondestructive testing of composite material and selection of the most suitable one according to specific advantages were compared. An experiment was carried out to determine the strength limits of carbon fiber using a hardware and software complex by acoustic emission method. The research results are presented in the form of drawings projected by the hardware and software complex.
***Results.*** The application of the acoustic-emission method of composite material control is described.
***Discussion and Conclusions.*** The results obtained experimentally can be used in the process of determining the strength limits of various composite materials by the acoustic emission method of nondestructive testing to assess the technical condition in mechanical engineering, shipbuilding, and aircraft construction. The paper is recommended to researchers involved in the design of aircraft and unmanned aerial vehicles.

***Keywords***: composite material, fiberglass, boron-fiber reinforced plastic, carbon fiber, organoplastics, aircraft, unmanned aerial vehicle, non-destructive testing, acoustic emission control, X-ray control, thermal control.

***For citation:*** A. V. Popov, A. O. Samuylov, I. S. Cherepanov. Application and evaluation of the technical condition of composite materials in aircraft and unmanned aerial vehicles by acoustic emission method of nondestructive testing. Advanced Engineering Research, 2021, vol. 21, no. 4, pp. 328–336. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-4-328-336

**Введение.** Развитие современной авиационной техники (АТ) сопровождается созданием новых конструкционных композитных материалов (КМ) с перспективными механическими и физическими свойствами. Уменьшение взлетного веса конструкции является неотъемлемой задачей для авиационной промышленности. Конструкция планера большей части современных воздушных судов (ВС) выполнена на 53 % из КМ, а беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) — на 90 %. Исходя из этого, есть необходимость в оценке технического состояния КМ планера радиационными, тепловыми, акустико-эмиссионными (АЭ) методами неразрушающего контроля (НК). Специфической особенностью метода акустической эмиссии является возможность оценки развития различных дефектов.

Целью исследования являлось повышение точности и оперативности оценки трещиностойкости композиционных материалов за счет применения акустико-эмиссионного контроля.

Композиционный материал — искусственно созданный человеком материал, получаемый соединением в одну структуру разнородных составляющих и характеризующийся лучшими свойствами, по сравнению со свойствами каждого из компонентов.

КМ имеет следующие отличительные признаки:

– запроектированные состав и форма;
– невозможность встречи аналога в природе;
– состав определяется набором n компонентов;
– свойства КМ определяются свойствами компонентов;
– «служебные свойства» — отсутствие таких свойств у компонентов по раздельности;
– неоднородность в микромасштабе;
– неоднородность в макромасштабе.

Основные преимущества и недостатки КМ приведены в таблице 1:

Таблица 1

Основные преимущества и недостатки КМ

| № п/п | Преимущества | Недостатки |
|---|---|---|
| 1 | Низкая плотность (ρ = 1,35–4,8 г/см$^3$) | Сложная технология получения |
| 2 | Высокая прочность ( $б_в$ = 1750 МПа) | Высокая стоимость КМ |
| 3 | Высокая жесткость ( Е = 270 000 Мпа) | Невысокая прочность связи волокон с матрицей |
| 4 | Жаропрочность | Низкое сопротивление эрозии и деструкция |
| 5 | Термическая стабильность | |

Основные материалы, применяемые в авиастроении, приведены на рис. 1 [1].

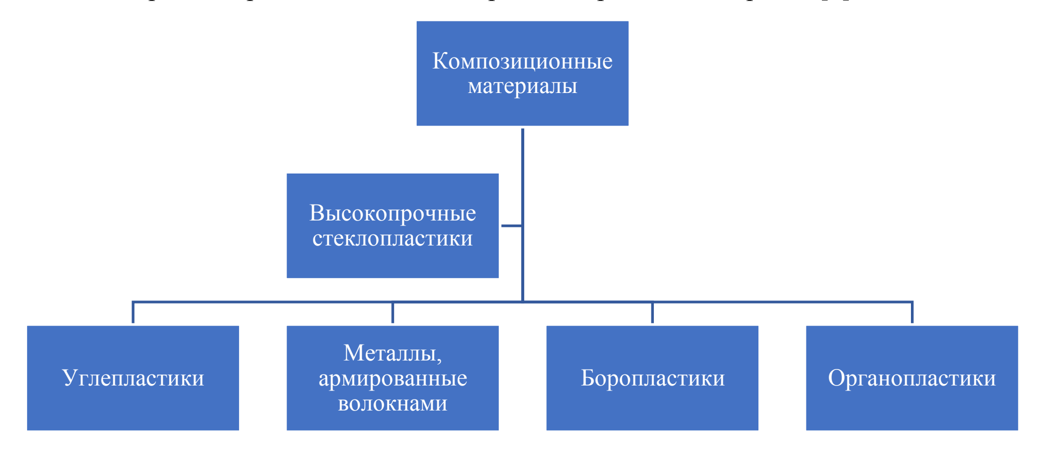



Рис. 1. Классификация КМ

**Материалы и методы**

*Высокопрочные стеклопластики*

Стеклопластики — КМ, состоящие из полимерной матрицы и стекловолоконного наполнителя, в котором присутствуют газообразные включения. Объем использования стеклопластиков различного назначения увеличивается. Это обосновано невысокой стоимостью и доступностью сырья, малой энергоемкостью производства стеклянного волокна, универсальностью и возможностью регулирования в широких пределах физико-механических свойств, возможностью создания гибридных материалов и конструкций на их основе. Изделия из стеклопластиков поддаются всем видам механической обработки. К основным примерам стеклопластиков, применяемым при создании ВС и БПЛА, относят: КАСТ-В листовой, ВФТ-С, СТ-911-1А, СК-9ФА, СТМ-Ф герметичный, ВПС-19М герметичный [2, 3].

*Углепластики*

Углепластики — КМ, состоящие из связующего и упрочнителей в виде углеродных волокон, нитей, жгутов, лент или тканей. Связующими выступают различные эпоксидные или фенолоформальдегидные смолы. Основные марки углепластиков: КМУ-1, КМУ-1У, КМУ-1В, КМУ-1Л, КМУ-2Л, КМУ-3Л, КМУ-3, КМУ-4Л, КМУ-4Э, КМУ-6-41.

*Боропластики*

Боропластики — КМ, состоящие из полимерного связующего и упрочнителя — борных волокон. В качестве матрицы используют эпоксидные и полиамидные связующие, а в роли упрочнителей — борные нити или комплексные боростеклонити. Применение боростеклонитей облегчает технологический процесс изготовления боропластиков. К ним относят: КМБ-1, КМБ-1М, КМБ-1К, КМБ-2К, КМБ-3К.

*Органопластики*

Органопластики — КМ, в которых в качестве армирующего наполнителя выступают волокнистые наполнители. Синтетические волокна обладают хорошими текстильными свойствами. Из них можно получить широкий спектр различных структур: нити, жгуты, ленты, комбинированные ткани. Синтетические волокна незначительно теряют прочность при текстильной переработке. Они малочувствительны к повреждениям. Примеры органопластиков: 7Т, 7Т0, 5Т, 9Т, 6ТКС, 6ТКБ, 7ТКС, 8ТКС.

*Металлы, армированные волокнами*

Металлы, армированные волокнами, — КМ, в которых в качестве упрочнителя выступают волокна бора, углеродные волокна, нитевидные кристаллы тугоплавких соединений. В качестве матрицы применяют различные металлы и сплавы, обладающие характерной пластичностью.

Примеры таких материалов: алюминий-борное волокно (ВКА-1А), алюминий-угольное волокно (ВКУ-1), магний-борное волокно (ВКМ-1), магний- угольное волокно, никель-фольфрамовая проволока (ВКН-1).

Объемы использованных КМ в конструкции планера перспективного ЛА различны и составляют: крыло — 80 %, оперение — 81 %, фюзеляж — 31 %, пилон — 34 %, шасси — 23 %. Органы управления самолета Ил-96-300, лопасти несущего винта вертолета Ми-28, планер самолета МС-21 частично выполнены из КМ.

Объем КМ планера БПЛА достигает 90 %. Яркими примерами являются «Крунк», «Дозор-600», «Иноходец».

Применение КМ в планере ВС и БПЛА может значительно облегчить вес конструкции. По формулам (1), (2) можно определить изменение массы планера при применении в нем КМ:

$$\Delta m_{пл} = m^{т}_{пл} - m^{к}_{пл} = \left(\sum_{i=1}^{n} m^{т}_{пл_i} + \Delta m\right) - \left(\sum_{i=1}^{n} m^{т}_{пл_i} - \sum_{i=1}^{n} \varphi_i (1-\varepsilon_i)\right) m^{т}_{пл_i} + \Delta m \quad (1)$$

$$\Delta m_{пл} = \sum_{i=1}^{n} \varphi_i (1-\varepsilon_i)\, m^{т}_{пл_i} \quad (2)$$

где $m^{т}_{пл}$ — масса i-й части планера из традиционных материалов; $m^{к}_{пл}$ — масса i-й части планера из композиционных материалов; $m$ — масса традиционных материалов; $\varphi_i$ — коэффициент, учитывающий отношение масс традиционных и композиционных материалов, значения которого лежат в диапазоне $0 \le \varphi_i \le 1$; $\varepsilon_i$ — коэффициент массового достоинства КМ, равный отношению массы элементов i-й части планера из КМ к массе i-й части из традиционных материалов ($\varepsilon_i = \frac{m^{к}_{пл_i}}{m^{т}_{пл_i}}$).

Если $\Delta m_n > 0$, то $m^{к}_{пл} < m^{т}_{пл}$ — планер из КМ легче планера из традиционных материалов. Применяя формулы (1) и (2) можно добиться снижения массы конструкции планера ВС на 28 %, БПЛА — на 60 %.

Вследствие влияния эксплуатационных факторов (рис. 2) возможно возникновение дефектов в КМ, представленных в таблице 2 [1].

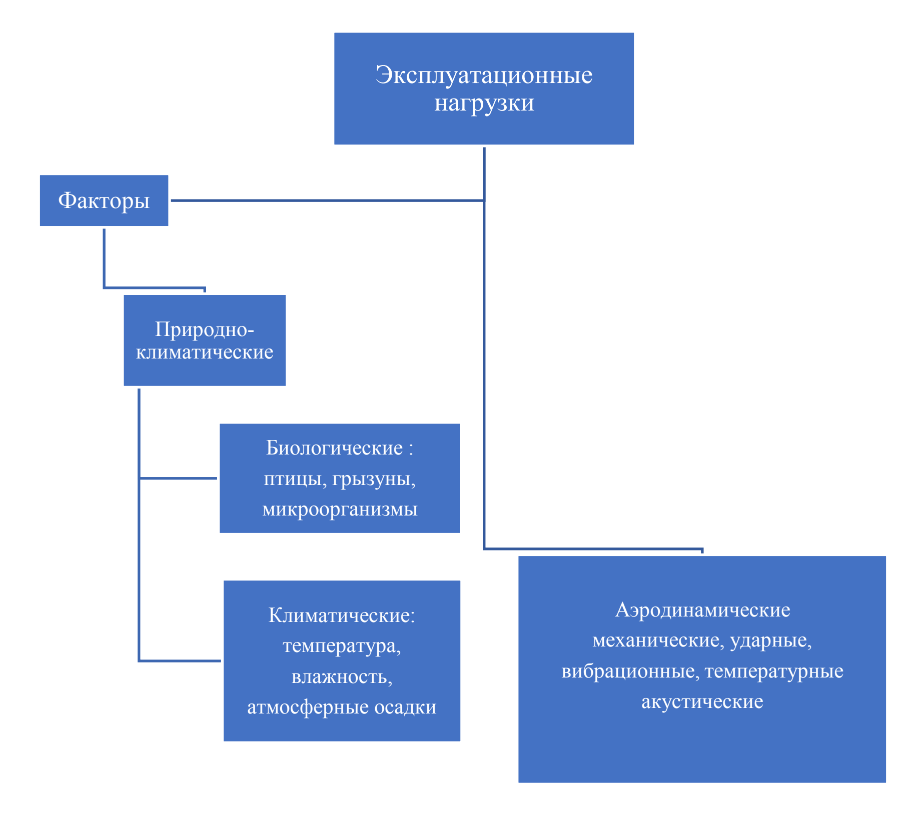



Рис. 2. Классификация эксплуатационных факторов влияния на структуру КМ [1]

Таблица 2

Классификация и характеристика дефектов КМ

| Наименование дефекта | Изображение дефекта | Причины возникновения дефекта |
|---|---|---|
| Поверхностная трещина<br>Внутренняя трещина<br>Сквозная трещина | | Высокая скорость охлаждения, превышение допустимых механических нагрузок, транспортировка |
| Раковина | | Повышение содержания летучих в препреге, изменение скорости нагрева, увеличение времени и величины приложения давления |
| Поверхностное инородное включение | | Попадание инородных материалов при изготовлении препрега при его расколе и выкладке |

Данные дефекты можно диагностировать за счет применения методов неразрушающего контроля, позволяющих определить техническое состояние планера ВС или БПЛА без уменьшения их пригодности к применению.

К таким методам относят:

– рентгеновский метод;

– тепловой метод;

– ультразвуковой метод;

– метод акустической эмиссии (АЭ).

*Рентгеновский метод*

Рентгеновский метод основан на приеме и анализе проникающего ионизирующего излучения после взаимодействия с контролируемым объектом. Интенсивность излучения изменяется в зависимости от плотности материала, его толщины и наличия дефектов[1]. Для регистрации прошедшего излучения применяются рентгеновские пленки выбранной вариационной чувствительности, флуоресцирующие экраны и телевизионные установки. Часть конструкции планера ЛА или БПЛА помещается в рентгеновскую установку «СаФайр» для осуществления контроля. Результат проведения рентгеновского излучения проецируется на пленке, в которой дефект будет изображен цветом бледнее, чем фон всей конструкции. Основным недостатком рентгеновского метода является вредное воздействие на объект и субъект контроля [4, 5].

*Тепловой метод*

Тепловой метод основан на приеме данных об изменении тепловых температурных полей контролируемых объектов, вызванных дефектами. Данный метод осуществляется посредством применения тепловизоров и авиационных фенов.

Первоначально происходит нагрев 1/3 части конструкции планера БПЛА при помощи авиационного фена. На межмолекулярном уровне происходит передача энергии от более нагретой части планера к более холодной. Наблюдаем процесс перетекания энергии используя тепловизор. Окраска дефекта отличается от описываемого выше процесса (рис. 3) [6–8].

[1]Феррозондовый метод неразрушающего контроля деталей вагонов. Руководящий документ РД 32.149. Москва: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. 2008. 163 с.

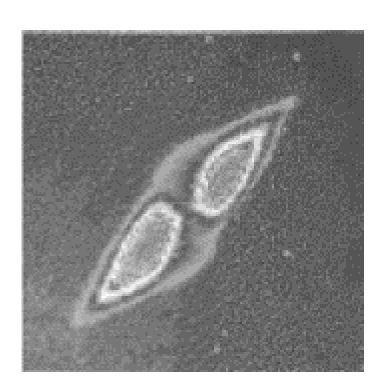


Рис. 3. Изображение дефекта планера БПЛА путем применения теплового метода

Недостаток данного метода — неспособность осуществления проведения контроля в необогреваемых помещениях.

*Ультразвуковой метод*

Ультразвуковой метод основан на регистрации упругих волн, создавшихся в контролируемой детали. Дефектоскопы УД2В-П, УДТ-40, УСД-50 позволяют обнаруживать трещины порядка 0,5–1 мм. Для осуществления контроля необходимо установление контактной среды между контролируемой частью планера ЛА или БПЛА и приемником-преобразователем дефектоскопа [9–11]. Основной недостаток — вредное воздействие на субъект контроля.

*Метод акустической эмиссии (АЭ)*

Метод АЭ основан на процессе излучения акустических волн в процессе перестройки структуры материала. Данный метод является пассивным, так как основан на регистрации низкочастотных импульсов дефектов деталей под нагружением. АЭ метод, в сравнении с традиционными методами НК, обнаруживает глубоко залегающие трещины в конструкции материала (таблица 3).

Таблица 3

Сравнение методов НК

| **Метод НК** | **Длина обнаруживаемой трещины, мм** |
|---|---|
| Ультразвуковой | 0,5–1 |
| Рентгеновский | 2–3 |
| Акустической эмиссии | 0,000001 |
| Тепловой | 0,01–0,001 |

Для диагностики был создан экспериментальный образец аппаратно-программного комплекса АЭ диагностики, который позволяет в реальном масштабе времени регистрировать развивающиеся дефекты КМ в низкочастотном диапазоне (рис. 4). Для повышения эффективности АЭ контроля специалистами Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (ВУНЦ ВВС «ВВА»), в число которых входил и автор данной статьи А. В. Попов, был разработан теоретико-вероятностный подход к оценке информативных параметров эмиссии. Установлено, что на ранних стадиях деформирования поток сигналов АЭ КМ от микродефектов, случайным образом распределённых по объему ВС, имеет пуассоновский характер. С ростом нагрузки объединение микродефектов в трещину КМ нарушает пуассоновское распределение. Разработанный специалистами центра способ оценки процессов накопления повреждений КМ в ЛА и БПЛА основан на оценке изменения распределений числа актов АЭ на фиксированных интервалах времени в процессе деформирования КМ. Деформация КМ приводит к образованию макродефекта, характеристики потока импульсов становятся зависимыми. Объединение микродефектов ОК разрушает гипотезу пуассоновского распределения. Данное явление позволяет построить параметрические инварианты, справедливые для пуассоновского характера, и на этой основе оценить отклонение анализируемого процесса от пуассоновского (3):

$$I_1 = \frac{m[x^3]}{m^2[x^3]} - 3m^2[x] - m^4[x] = 1 \quad (3)$$

На основании уравнения (3) получим несколько выражений для определения степени отклонения потока импульсов АЭ от пуассоновского (4)–(7):

$$I_2 = m[x^3] * m^2[x] - 3m^4[x] - m^6[x] - m^2[x] = 1 \quad (4)$$

$$I_3 = m[x^3] - 3m^2[x] - m^4[x] - 1 = 0 \quad (5)$$

$$I_4 = m[x^3] * m^2[x](3 - m^2[x]) = 1 \quad (6)$$

$$I_5 = \frac{m[x^5]-1}{m^2[x]} + m^2[x] = 3 \quad (7)$$

Построение инвариантных зависимостей на основании формул (3)–(7) производит экспериментально разработанный АПК (рис. 4), позволяющий осуществить многоканальную регистрацию, обработку и анализ значений нагрузок и деформаций; осуществлять видеонаблюдение и запись процесса испытаний и показаний аналоговых приборов при помощи видеокамер.

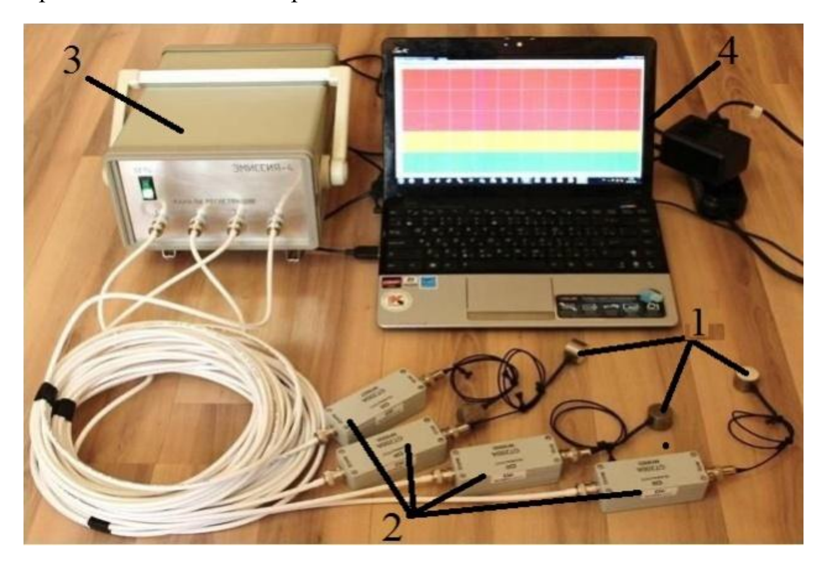



Рис. 4. Аппаратно-программный комплекс акустико-эмиссионной диагностики: 1 — высокочувствительный пьезоэлектрический датчик GT-300; 2 — предусилители виброакустического сигнала; 3 — аналого-цифровой преобразователь; 4 — ПЭВМ для обработки данных

Высокочувствительные пьезоэлектрические датчики GT-300 устанавливаются на контролируемую поверхность КМ. Информативные параметры о состоянии КМ с пьезоэлектрических датчиков поступают на предусилители виброакустического сигнала [2]. После усиления сигнал поступает на аналого-цифровой преобразователь, в котором происходит его преобразование из механической работы в электрическую. ПЭВМ служит для кластеризации и обработки принятых данных.

**Результаты исследования.** При помощи АПК и разрывной машины РМ-1 на базе ВУНЦ ВВС «ВВА» производили контроль углепластика КМУ-1, применяемого в производстве самолета ИЛ-96-300 и БПЛА «Орион». Основные характеристики КМУ-1 представлены в таблице 4:

Таблица 4

**Характеристика углепластика КМУ-1**

| № п/п | Пределы композита |
|---|---|
| 1 | Предел растяжения $\sigma_{раст}$= 1020 МПа |
| 2 | Предел сжатия $\sigma_{сжат}$= 400 МПа |
| 3 | Предел изгиба $\sigma_{изг}$= 1100 МПа |
| 4 | Предел сдвига $\sigma_{сдвиг}$= 30 МПа |
| 5 | Модуль Юнга растяжения $E_{раст}$= 180×$10^{-3}$МПа |
| 6 | Модуль Юнга изгиба $E_{изг}$= 145×$10^{-3}$МПа |
| 7 | Модуль Юнга сдвига $E_{сдвиг}$= 3,5×$10^{-3}$МПа |

Для проведения испытаний поместили КМУ-1 в разрывную машину, предварительно установив на КМ датчики АЭ GT-300. Производили нагружение КМУ-1 при помощи АПК. Результаты нагружения представлены на рис. 5 (*а, б, в*):

[2] Попов А. В. Способ оценки процессов разрушения конструкций при акустико-эмиссионной контроле пат. 223444 Российская Федерация. G01N 29/00. заявл. 15.01.2003; опубл. 27.07.2004. Бюл. №21. 7 с.

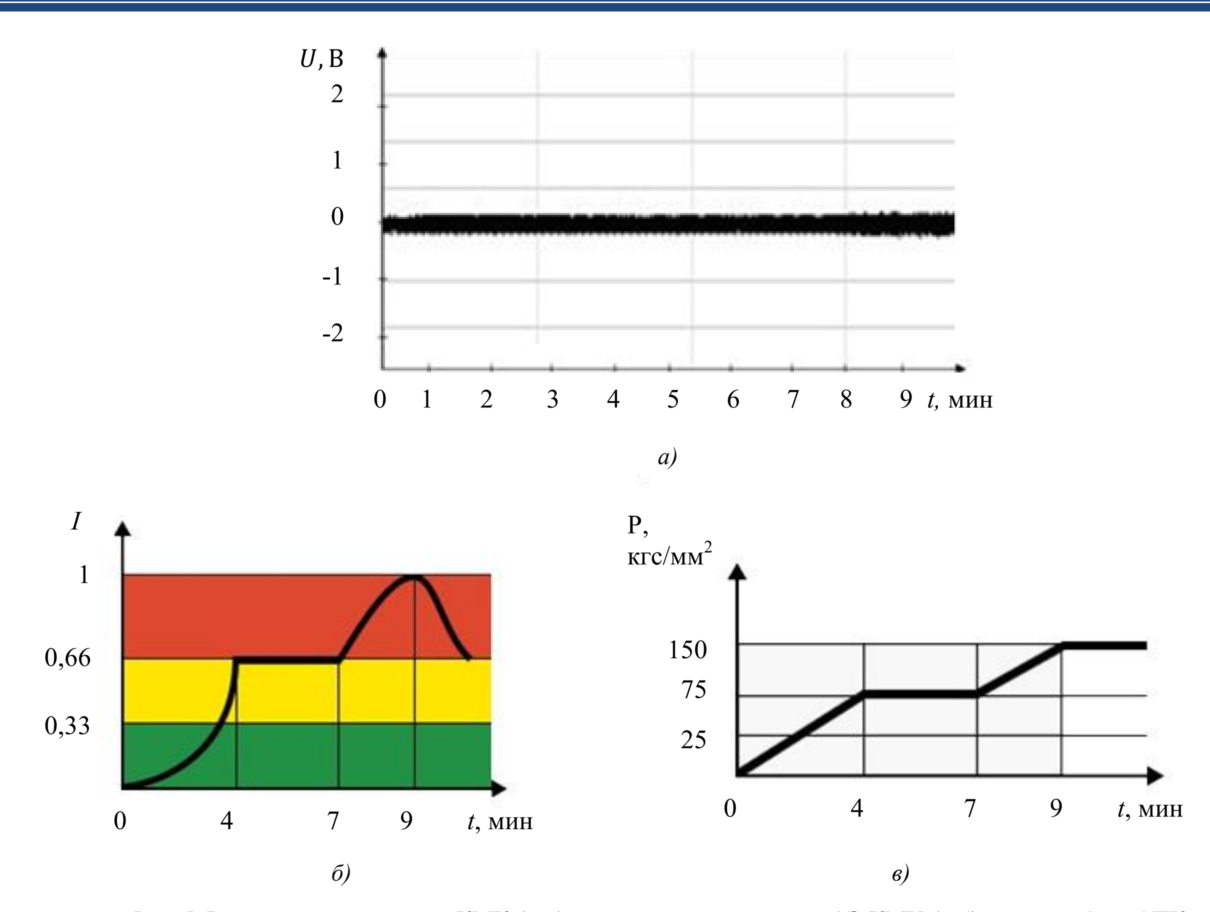



Рис. 5. Результаты нагружения КМК-1: *а)* осциллограмма сигналов АЭ КМУ-1; *б)* режим работы АПК; *в)* проекция динамики нагружения РМ-1 КМ КМУ-1

На рис. 5 *а* изображена осциллограмма сигналов АЭ КМУ-1. Максимальное значение амплитуды АЭ ОК соответствует разрушению матрицы и волокон ОК ( $U_{max} = 0{,}25$ В).

На рис. 5 *б* представлен режим работы АПК. Здесь выделены три зоны — красная, желтая, зеленая. Красная зона характеризуется наличием ярко выраженных дефектов КМУ-1. Численное значение инварианта в пределах от 0,66 до 1 при t = 7–9 мин. Это свидетельство критически активного дефекта — стадия разрушения. Желтая зона — зона активного дефекта и стадии образования трещины (I=0,33–0,66; t = 4–7 мин). Зеленая — доброкачественная зона, характеризующая стадию микротрещин (I=0–0,33; t = 9–4 мин) [12, 13].

На рис. 5 *в* представлена проекция динамики нагружения РМ-1 КМ КМУ-1. Вследствие увеличения нагрузки ($P = 25{,}75{,}150$ кгс/мм$^2$) растет значение инварианта и амплитуды АЭ КМУ-1.

**Обсуждение и заключения.** Применение КМ является перспективным методом оценки технического состояния при проектировании различных ВС и БПЛА. Одно из основополагающих преимуществ КМ — облегчение массы конструкции по сравнению с традиционными материалами. Контроль и оценку технического состояния ВС и БПЛА необходимо производить перспективными методами НК, способными выявить различного рода дефекты на ранней стадии их развития. Этим требованиям отвечает метод акустической эмиссии. В перспективе можно установить экспериментальный образец аппаратно-программного комплекса на многофункциональный истребитель пятого поколения Су-57 для осуществления диагностирования конструкции летательного аппарата в полете. Данная акустико-эмиссионная система позволит идентифицировать дефекты, возникающие в элементах конструкции воздушного судна на малой стадии их развития. Экспериментально разработанный образец аппаратно-программного комплекса позволяет оперативно в реальном масштабе времени регистрировать развивающиеся дефекты авиационных материалов, применяемых в конструкции летательных аппаратах и беспилотных летательных аппаратах.

**Библиографический список**

1. Волоконные композиционные материалы: пер. с англ. / Под ред. Дж. Уитона, Э. Скала. — Москва: Металлургия, 2011. — 240 с.

2. Григорович, В. К. Дисперсионное упрочнение тугоплавких металлов / В. К. Григорович, Е. Н. Шефтель. — Москва: Наука, 1980. — 303 с.

3. Ермоленко, И. Н. Волокнистые высокотемпературные керамические материалы / И. Н. Ермоленко, Т. М. Ульянова. — Минск: Наука и техника, 1991. — 125 с.

4. Степанова, Л. Н. Использование метода акустической эмиссии при циклических испытаниях композиционных элементов авиационных конструкций / Л. Н. Степанова, В. Н. Чаплыгин, Е. Ю. Лебедев // Контроль. Диагностика. — 2004. — № 12. — С. 53.

5. Буйло, С. И. Диагностика стадий разрушения материалов по восстановленным параметрам потока актов акустической эмиссии / С. И. Буйло // Контроль. Диагностика. — 2000. — № 10. — С. 10–15.

6. Чуи, Ч. Введение в вейвлеты / Ч. Чуи. — Москва: Мир, 2001. — 412 с.

7. Muravin, B. Guide for Development of Acoustic Emission Applications for Examination of Metal Structure / Boris Muravin, Mark F. Carlo // Journal of Acoustic Emission. — 2011. — Vol. 29. — P. 142–148.

8. Blind deconvolution of acoustic emission signals for damage identification in composites / Gangtie Zheng, M.A. Backle, G. Kister, Gerard F. Fernando // AIAA Journal. — 2001. — Vol. 39. — P. 1198–1205. https://doi.org/10.2514/2.1435

9. Skalskyi, V. R. Some methodological aspects of application of acoustic emission / V. R. Skalskyi, P. M. Koval. — Lviv: Spolom; 2007. — 336 p.

10. Maochen Ge. Analysis of Source Location Algorithms, Part I: Overview and non-iterative methods / Maochen Ge // Journal of Acoustic Emission. — 2003. — Vol. 21. — P. 14–28.

11. Barat, V. Detection of AE signals against background friction noise / V. Barat, D. Grishin, M. Rostovtsev // Journal of Acoustic Emission. — 2011. — Vol. 29. — P. 133–141.

12. Попов, А. В. Метод контроля прочности силовых элементов конструкций на основе оценки численно-временных характеристик АЭ процессов / А. В. Попов, Е. А. Кондрашин // Контроль. Диагностика. — 2008. — № 7. — С. 45–46.

13. Попов, А. В. Определение прочностных характеристик конструкций на основе амплитудных инвариантов акустико-эмиссионных процессов / А. В. Попов, В. Э. Жумай // Контроль. Диагностика. — 2008. — № 10. — С. 29–31.

Поступила в редакцию 28.09.2021
Поступила после рецензирования 18.10.2021
Принята к публикации 18.10.2021

*Об авторах:*

**Попов Алексей Владимирович**, профессор кафедры «Восстановление боевой авиационной техники» Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (394052, РФ, г. Воронеж, ул. Краснознаменная 153), доктор технических наук, профессор, ORCID, irinacherepanova2007@mail.ru

**Самуйлов Александр Олегович**, адъюнкт кафедры «Восстановление боевой авиационной техники» Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (394052, РФ, г. Воронеж, ул. Краснознаменная 153), ORCID, slavka2.0@mail.ru

**Черепанов Иван Сергеевич**, курсант факультета летательных аппаратов Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (394052, РФ, г. Воронеж, ул. Краснознаменная, 153), ORCID, veselova.27@icloud.com

*Заявленный вклад соавторов:*

Черепанов И. С. — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов; Попов А. В., Самуйлов А. О. — научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*